

تخمین پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب‌شدن خاک با استفاده از حل معکوس فرایند نفوذ تحت بار افتان توسط مدل HYDRUS-1D

فاطمه رزاقی^{۱*}، طیبه مرزبان^۲ و جهانشیر محمدزاده هایلی^۳

چکیده

تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند منحنی مشخصه رطوبتی که در شبیه‌سازی جریان آب، آلاینده کشاورزی و هیدرولوژی استفاده می‌شوند، امری ضروری است. در پژوهش حاضر، دقت تخمین پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب‌شدن خاک با استفاده از حل معکوس فرایند نفوذ تحت بار افتان توسط مدل HYDRUS-1D بررسی شد. برای این منظور، از دو گروه داده‌های آزمایشگاهی و میدانی نفوذ تجمعی آب به درون خاک تحت بار افتان استفاده شده است. گروه اول شامل داده‌هایی است که در یک ستون خاک آزمایشگاهی با بافت ماسه‌ای و دو رطوبت اولیه متفاوت خاک انجام شده است. گروه دوم شامل داده‌های میدانی است که از اندازه‌گیری نفوذ تجمعی تحت بار افتان و با استفاده از استوانه مضاعف در شرایط سه مزرعه با بافت لومی، لومی شنی و لومی رسی به دست آمد. در هر دو گروه از داده‌ها، ابتدا با استفاده از صفحات فشاری و اندازه‌گیری رطوبت، منحنی‌های مشخصه خاک‌های مورد مطالعه به دست آمد و سپس مقدار رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اشباع شاخه مرطوب‌شدن و داده‌های نفوذ تجمعی به‌عنوان داده ورودی به مدل HYDRUS-1D وارد شد و با استفاده از روش حل معکوس سایر پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب‌شدن خاک تخمین زده شد. مقایسه داده‌های منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در شرایط آزمایشگاه نشان داد که در هر دو خاک و برای هر دو مدل ون‌گنوختن و بروکز-کوری مقادیر R^2 و NRMSE به ترتیب بیشتر از ۰/۹۵ و کمتر از ۰/۰۲ به دست آمد که بیانگر این است که مدل به خوبی توانسته است شبیه‌سازی را انجام دهد. نتایج مشابهی برای شرایط مزرعه نیز حاصل شد. نتایج به دست آمده بیانگر این است که مدل HYDRUS-1D می‌تواند با استفاده از روش حل معکوس فرایند نفوذ تحت بار افتان، پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب‌شدن خاک را با دقت بالایی تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: بار افتان، شاخه مرطوب‌شدن، منحنی مشخصه خاک، نفوذ، HYDRUS-1D.

ارجاع: رزاقی ف. مرزبان ط. و محمدزاده هایلی ج. ۱۴۰۲. تخمین پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب‌شدن خاک با استفاده از حل معکوس فرایند نفوذ تحت بار افتان توسط مدل HYDRUS-1D. ۴۸: ۳۵-۴۵. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13988.2438>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران و پژوهشگر مرکز مطالعات خشکسالی، دانشگاه شیراز، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

* نویسنده مسئول: razzaghi@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

مقدمه

پارامترهای هیدرولیکی خاک نقش مهمی در چرخه آبی دارند و جزء اطلاعات پایه در طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، مسائل هیدرولوژی و ارزیابی کیفیت خاک هستند. این پارامترها با روش‌های متفاوت مستقیم و غیرمستقیم قابل اندازه‌گیری یا برآورد هستند. اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها نیازمند هزینه و زمان زیادی است و همچنین به علت تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد، برای اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها باید تعداد نمونه‌های زیادی در شرایط مزرعه تهیه شود (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۴). نفوذپذیری، یکی از ویژگی‌های خاک است که تحت تأثیر عوامل مختلف مانند پوشش گیاهی، بافت خاک، فشردگی، ساختمان خاک، شیب سطح زمین، رطوبت اولیه و دمای آب و خاک قرار دارد (ونگ و همکاران، ۲۰۰۸). میزان نفوذ و تغییرات آن با زمان به مقدار رطوبت اولیه، بافت خاک، ساختار و یکنواختی مشخصات خاک بستگی دارد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲ الف و ب). با انجام آزمایش نفوذ تجمعی با بار ثابت یا بار افتان می‌توان پارامترهای هیدرولیکی خاک را برآورد کرد (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۴). یکی از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع، منحنی مشخصه خاک است که ارتباط بین مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک خاک را نشان می‌دهد و تعیین آن در پژوهش‌های کشاورزی حائز اهمیت است (میناسنی و مک-براتنی، ۲۰۰۲). برای توصیف منحنی مشخصه خاک، مدل‌های مختلفی مثل ون‌گنوختن-معلم، بروکز-کوری، کمپل، گاردنر و کازوگی ارائه شده‌اند. در بین این مدل‌ها ون‌گنوختن-معلم و بروکز-کوری دارای بیشترین کاربرد در مبحث شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های غیراشباع هستند.

تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش مستقیم به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این پارامترها نیازمند تهیه نمونه‌های زیادی در شرایط مزرعه است تا بتوان به توصیف دقیق آن‌ها پرداخت (سیمونک و ون‌گنوختن، ۱۹۹۶). روش غیرمستقیم برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، روش حل معکوس است که با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را برآورد می‌کند (هپمنز و همکاران، ۲۰۰۲ ب). نتایج پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است نشان می‌دهد که این روش در برآورد

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های ورودی به ستون خاک و خروجی از ستون خاک، در شرایط آزمایشگاهی و میدانی دقت قابل‌قبولی داشته است (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۲). روش حل معکوس نسبت به سایر روش‌ها، ارزان‌تر و سریع‌تر است. از برتری‌های این روش این است که پارامترهای مؤثر را تخمین می‌زند و توانایی برآورد هم‌زمان ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح را دارد (عباسی، ۱۳۸۶). در این راستا، مدل HYDRUS-1D یک مدل پیشرفته در رابطه با حرکت یک‌بعدی آب، املاح و گرما در خاک است که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه بسط داده شده است (عباسی و همکاران، ۲۰۰۳). این مدل می‌تواند با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی آب تحت بار ثابت، منحنی مشخصه آب خاک را برای شاخه مرطوب شدن، با دقت بسیار بالایی شبیه‌سازی کند (محمدزاده هابیلی و خلیلی، ۲۰۲۱). این مدل قابلیت شبیه‌سازی نفوذ تحت بار ثابت به داخل خاک‌های لایه‌ای را نیز دارد (محمدزاده هابیلی و حیدرپور، ۲۰۱۵). همچنین این مدل می‌تواند با استفاده از داده‌های نفوذ و به روش حل معکوس، پارامترهای هیدرولیکی را تخمین زده و منحنی مشخصه خاک را شبیه‌سازی کند (هپمنز و همکاران، ۲۰۰۲ الف). در تحقیقی، باباگلی سفیدکوهی و همکاران (۱۳۹۳) تأثیر عمق آب را روی میزان نفوذ آن در خاک با بافت لومی رسی در مزرعه شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرم‌افزار HYDRUS-1D در پیش‌بینی سرعت نفوذ آب در خاک دقت بالایی دارد؛ اما در پیش‌بینی مقدار نفوذ تجمعی آب مشکل دارد و سرعت جذب آب به خاک را نمی‌تواند به‌طور دقیق پیش‌بینی کند. محمدزاده هابیلی و خلیلی (۲۰۲۱) در پژوهشی برای اندازه‌گیری پارامترهای مدل گرین-آمپت از طریق آزمایش نفوذ با بار ثابت روی دو ستون خاک ماسه‌ای با در نظر گرفتن مقادیر مختلف رطوبت اولیه خاک، منحنی‌های مشخصه آب خاک را مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای مدل گرین-آمپت را در مدل HYDRUS-1D شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای مدل گرین-آمپت مقادیر ثابت و مستقل از مقدار رطوبت اولیه آب خاک هستند. همچنین مدل HYDRUS-1D توانست مقدار نفوذ تجمعی آب به داخل خاک همگن را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند. فرامستی و شاکری (۱۳۹۷) در پژوهشی برای شبیه‌سازی

کیلومتری شمال شرقی شیراز در دشت باجگاه انجام شده است.

آزمایش‌های نفوذ در آزمایشگاه

داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش (جدول ۱) از محمدزاده هابیلی و حیدرپور (۱۳۹۸) گرفته شده است که آزمایش نفوذ آب روی دو ستون از خاک ماسه‌ای A و B، تحت بار افتان در رطوبت‌های اولیه متفاوت خاک انجام شده است. روی سطح خاک A بار آبی به ارتفاع ۱۷/۶ سانتی‌متر و خاک B بار آبی به ارتفاع ۱۹/۲ سانتی‌متر قرار داده شده و برای هر خاک دو آزمایش نفوذ در دو رطوبت متفاوت انجام شده است. نفوذ تجمعی آب به داخل خاک در زمان‌های مختلف تا زمانی که جبهه رطوبتی به انتهای ستون خاک رسیده، ثبت شده است. پس از محو شدن آب از روی سطح خاک، با استفاده از یک پمپ خلأ، ستون خاک به مدت تقریبی ۳۰ دقیقه زهکشی و میزان رطوبت آن تا حد امکان کم شده است و رطوبت حجمی اولیه آن با وزن کردن ستون خاک و استفاده از روابط حجمی-وزنی خاک محاسبه شده است.

نفوذ و برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن، از حل معکوس مدل HYDRUS-1D استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل HYDRUS-1D نفوذ تجمعی را به خوبی شبیه‌سازی کرد؛ ولی با گذشت زمان، مقدار نفوذ تجمعی را بیشتر از داده‌های مزرعه تخمین زد. همچنین آن‌ها بیان کردند که مقدار ضریب همبستگی (R^2) در تمام ایستگاه‌های مزرعه (۴ ایستگاه) نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین داده‌های مزرعه و داده‌های مدل HYDRUS-1D بود. از آنجا که تاکنون پژوهش‌های زیادی روی نفوذ تحت بار ثابت و شبیه‌سازی آن، در مدل HYDRUS-1D انجام شده است و شبیه‌سازی نفوذ تحت بار افتان توسط مدل HYDRUS-1D کمتر مورد توجه قرار گرفته است، هدف از انجام این پژوهش تخمین پارامترهای هیدرولیکی شاخه مرطوب شدن منحنی مشخصه خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D و به روش حل معکوس معادله نفوذ تحت بار افتان است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه زهکشی بخش علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در ۱۶

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مشخصات آزمایش‌های نفوذ انجام شده دو خاک آزمایشگاهی مورد مطالعه (محمدزاده هابیلی و حیدرپور، ۱۳۹۸)

نمونه خاک	d^* (mm)	L (cm)	θ_s^* ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	H (cm)	θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$\Delta\theta$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
A	۰/۱۵ - ۰/۳	۳۸/۶	۰/۴۰۶	۱۷/۶	۰/۱۵۰	۰/۲۵۰
B	۰/۰۷۵ - ۰/۱۵	۳۷/۸	۰/۴۰۸	۱۹/۲	۰/۱۲۲	۰/۲۸۰
					۰/۲۷۱	۰/۱۳۳

* به ترتیب d: محدوده قطر ذرات خاک، L: طول ستون خاک، θ_s^* : رطوبت حجمی اشباع شاخه مرطوب شدن، H: ارتفاع بار آبی روی ستون خاک، θ_i : رطوبت اولیه حجمی و $\Delta\theta$: رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی

آزمایش صحرائی نفوذ

برای توضیح چگونگی تعیین نتایج آزمایشگاهی به آزمایش‌های صحرائی، آزمایش‌های نفوذ تحت بار افتان در دانشکده کشاورزی روی سه خاک کوی اساتید، شکاربانی و سری دانشکده به ترتیب با بافت‌های لومی، لومی شنی و لومی رسی انجام شده است. در یک فاصله نزدیک از محل انجام آزمایش، نمونه‌ای برای تعیین وزن مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه و تخلخل برداشته شد.

برای محاسبه تخلخل خاک شکاربانی و کوی اساتید (به علت بافت درشت و سنگلاخ بودنشان و همچنین متلاشی شدن خاک در هنگام برداشت نمونه)، ابتدا یک حجم خاک دست‌خورده برداشته و در آن قرار داده شد و بعد از ۲۴ ساعت وزن خاک خشک آن محاسبه شد. سپس، یک قطعه نایلون در کف قسمت نمونه‌برداری پهن کرده و با استفاده از میزان حجم آبی که در آن ریخته شده، حجم کل خاک و تخلخل محاسبه شد. آزمایش نفوذ

پارامترهای تعیین شده توسط مدل است. مقدار SSQ به صورت زیر محاسبه شده است.

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (X_{i_{obs}} - X_{i_{sim}})^2 \quad (3)$$

که در آن $X_{i_{obs}}$ و $X_{i_{sim}}$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی و مقادیر برآورد شده توسط مدل است. برای تعیین دقت تخمین مدل HYDRUS-1D در شبیه سازی منحنی مشخصه خاک، از جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE) و مربعات خطای نرمال (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) به صورت زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n O_{ave}^2} \right]^{0.5} \quad (5)$$

که در آن P_i مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر مشاهده ای، O_{ave} میانگین مشاهدات و n : تعداد مشاهدات است. مقدار NRMSE برحسب درصد بیان می شود و بیانگر نسبت اختلاف میان داده های مشاهده ای و برآورد شده نسبت به متوسط است. اگر مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه سازی بسیار خوب، اگر بیشتر از ۱۰ درصد کمتر از ۲۰ درصد باشد، شبیه سازی خوب؛ و اگر بیش از ۲۰ درصد و کمتر از ۳۰ درصد باشد، شبیه سازی نسبتاً خوب است (سولر و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج و بحث

نتایج داده های اندازه گیری شده در آزمایشگاه

برای مقایسه منحنی مشخصه اندازه گیری شده خاک های A و B با منحنی مشخصه شبیه سازی شده از مدل HYDRUS-1D از دو معادله ون گنوختن و بروکز-کوری استفاده شد. اینز و دراگرز (۲۰۰۲) و عباسی و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که دو پارامتر θ_r و l کمترین میزان تأثیر بر شبیه سازی حرکت آب در خاک را با استفاده از روش حل معکوس دارند و بهتر است از بهینه سازی آن ها صرف نظر شود. از آنجا که پارامتر θ_s (رطوبت خاک در حالت اشباع) مفهوم فیزیکی دارد و می توان این پارامتر را به صورت مستقیم اندازه گیری کرد (ریتز و همکاران، ۲۰۰۳)؛ بنابراین می توان آن را ثابت در نظر گرفت. همچنین با کاهش تعداد پارامترهایی که برای بهینه سازی

با استفاده از رینگ مضاعف (مشایخی و همکاران، ۱۳۹۵) انجام شد. پس از اتمام آزمایش، با استفاده از معادله (۱) میزان افزایش رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی ($\Delta\theta$, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) محاسبه شد (محمدزاده هایلی و حیدریور، ۲۰۱۵).

$$\Delta\theta = \frac{I_t \times A}{L_f \times A} \quad (1)$$

که I_t : عمق آب نفوذ یافته در داخل خاک از زمان شروع آزمایش تا زمان قرائت آخر سطح آب داخل رینگ (cm)، L_f : فاصله عمودی بین سطح زمین تا محل جبهه رطوبتی (cm) و A مساحت رینگ (cm^2) است. در این آزمایش مقدار I_t برای خاک های سری دانشکده، کوی اساتید و شکاربانی به ترتیب ۱۰/۵، ۱۱/۵ و ۱۲/۵ سانتی متر اندازه گیری شد. همچنین، رطوبت اشباع خاک در شاخه مرطوب شدن (θ_s^w ; $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) از معادله (۲) محاسبه شد.

$$\theta_s^w = \Delta\theta + \theta_i \quad (2)$$

که θ_i : رطوبت حجمی اولیه است.

منحنی مشخصه

برای شبیه سازی بار افتان با استفاده از مدل HYDRUS-1D و مقایسه نتایج به دست آمده با داده های آزمایشگاهی و میدانی، داده های نفوذ تجمعی به صورت داده های اولیه به مدل HYDRUS-1D داده شد و منحنی مشخصه خروجی مدل با منحنی مشخصه خاک های آزمایش صحرائی نفوذ و آزمایشگاهی مقایسه شد. برای به دست آوردن منحنی مشخصه از دستگاه سلول فشاری استفاده و مقدار رطوبت وزنی در مکش های مختلف (یک سوم بار، یک بار و پانزده بار) تعیین شد. سپس برای برازش منحنی مشخصه ون گنوختن-معلم با داده های به دست آمده از سلول فشاری، از برنامه SWRC Fit استفاده شد (سکی، ۲۰۰۷).

نحوه ارزیابی مدل HYDRUS-1D

در مدل HYDRUS-1D برآوردهای اولیه از پارامترهای بهینه شده مکرراً در طی فرایند کمینه سازی بهبود می یابند، تا اینکه به یک درجه دقت مطلوب برسد. در این مدل، نمایه SSQ (مجموع خطای مربع) ملاک درستی عمل مدل سازی پس از به پایان رسیدن اجرای برنامه و قبول

ون گنوختن توسط مدل HYDRUS-1D برای هر دو خاک و در هر دو رطوبت تا حدودی بیشتر از بروکز-کوری است. علت تفاوت‌های مشاهده‌شده بین پارامترهای هیدرولیکی شبیه‌سازی‌شده منحنی مشخصه ون گنوختن و بروکز-کوری، تفاوت نحوه کاربرد پارامترهای هیدرولیکی در معادله‌های بروکز-کوری و ون گنوختن است. در پژوهش‌های پیشین که توسط کارسل و پریش (۱۹۸۸)، سیمونک و همکاران (۲۰۰۶)، ساسیده‌اران و همکاران (۲۰۱۹) و مشایخی و همکاران (۱۳۹۵) صورت گرفته است، پارامترهای هیدرولیکی تخمین‌زده‌شده روی بافت خاک درشت‌دانه تقریباً مشابه پارامترهایی است که در این پژوهش به دست آمد. پس از اتمام شبیه‌سازی در مدل HYDRUS-1D و برآورد پارامترهای هیدرولیکی آن با معادله‌های ون گنوختن و بروکز-کوری نمودار مقایسه منحنی مشخصه آن‌ها برای هر دو خاک A و B رسم شد.

در مدل استفاده می‌شوند، درصد اطمینان بیشتر و زمان شبیه‌سازی کمتر می‌شود (هاپمنز و همکاران، ۲۰۰۲ ب). در تحقیقی راسو و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادند که تخمین همزمان پارامترهای معادله ون گنوختن-معلم باعث ناپایداری و همگرانشدن مدل در روش حل معکوس می‌شود و مدل نمی‌تواند به پاسخ منحصربه‌فردی برسد. بر این اساس، در این پژوهش برای شبیه‌سازی منحنی مشخصه، مقدار θ_r و θ_s^w ثابت در نظر گرفته شد و پارامترهای عکس مکش در نقطه ورود هوا (α^w)، پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (n^w) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) تخمین زده شدند (جدول ۲).

براساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برآوردشده در مدل بروکز-کوری، در دو رطوبت شبیه‌سازی برای هر کدام از خاک‌های A و B، از مقدار مدل ون گنوختن بیشتر به دست آمده است. همچنین، مقدار α^w و n^w شبیه‌سازی‌شده معادله

جدول ۱- برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک A و B با استفاده از مدل HYDRUS-1D

خاک	معادله	θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s^w ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α^w (cm^{-1})	n^w (-)	K_s (cm s^{-1})
A	ون گنوختن	۰/۵	۰/۱۵	۰/۰۳۶	۲/۹۷	۰/۰۱۳۶
	بروکز-کوری	۰/۵	۰/۱۵	۰/۰۲	۲/۴	۰/۰۳۸
	ون گنوختن	۰/۵	۰/۲۷۷	۰/۰۴۶	۲/۴	۰/۰۱۴۲۵
	بروکز-کوری	۰/۵	۰/۲۷۷	۰/۰۱	۲/۴	۰/۰۵۱
B	ون گنوختن	۰/۵	۰/۱۲۲	۰/۰۲۶	۲	۰/۰۰۷۲
	بروکز-کوری	۰/۵	۰/۱۲۲	۰/۰۲	۲/۱۱	۰/۰۱۹
	ون گنوختن	۰/۵	۰/۲۷۱	۰/۰۲۱	۲/۹	۰/۰۰۶۵
	بروکز-کوری	۰/۵	۰/۲۷۱	۰/۰۲	۲/۱	۰/۰۲۰۸

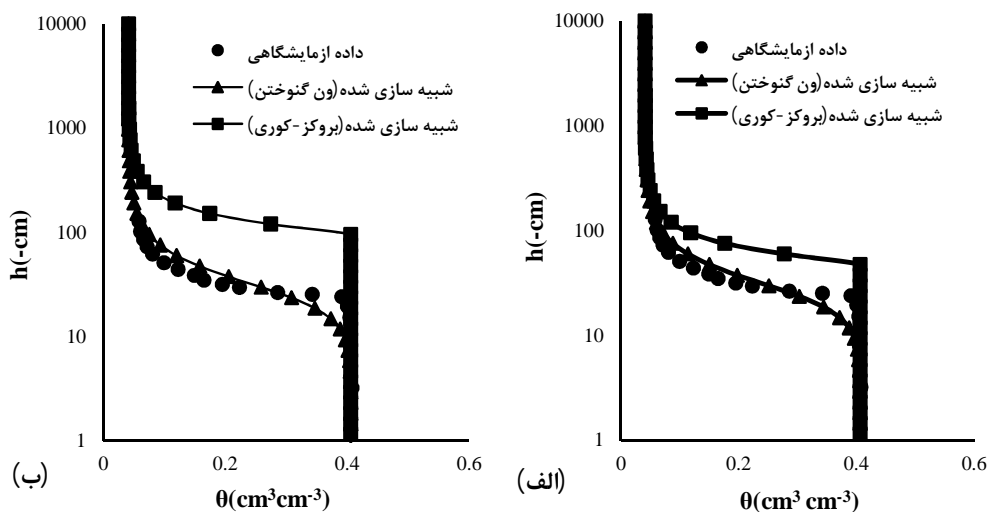
* به ترتیب i : پارامتر پیوستگی منافذ خاک، θ_i : رطوبت حجمی اولیه، θ_s^w : رطوبت حجمی اشباع شاخه مرطوب‌شدن، α^w : پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا (cm^{-1})، n^w : پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی و K_s : پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s^{-1}). ستون‌های i ، θ_s^w و θ_i برآورد نشده و ثابت در نظر گرفته شدند.

بیشترین تطابق با مدل بروکز-کوری ایجاد شود؛ در حالی که در مورد خاک A این مسئله رخ نداد. علت این موضوع، تغییر ساختمان خاک در اثر استفاده از الک‌های مختلف برای آماده‌سازی خاک‌ها در هنگام آزمایش است. در تحقیقی، فولادوند و گل‌کار (۱۳۹۷) مدل‌های مختلف منحنی مشخصه رطوبت خاک را به ۳۰ نمونه خاک استان فارس برازش دادند و نتایج‌شان نشان داد که برازش مدل‌های مختلف در خاک‌هایی با بافت متوسط مناسب‌تر از بافت‌های ریز و درشت است. همچنین در بافت ریز مدل‌های بروکز-کوری، کمپبل، ون گنوختن، فردلانگ و زینگ، گرانولت و گرانت و دکستر و همکاران، در بافت

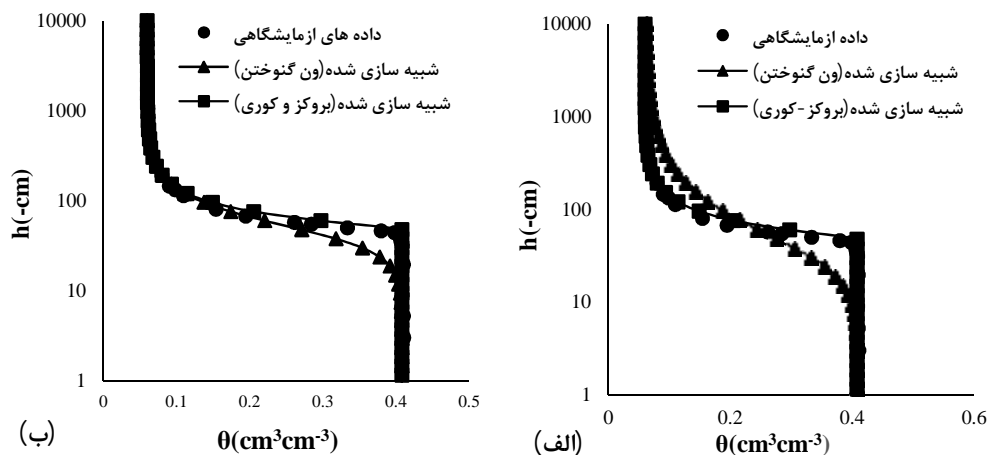
منحنی مشخصه اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده خاک A و B در دو رطوبت مختلف در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج در مورد خاک A نشان می‌دهد که تطابق بیشتری بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه با منحنی مشخصه شبیه‌سازی‌شده مدل ون گنوختن در هر دو رطوبت وجود دارد (شکل ۱). این در حالی است که در مورد خاک B، تطابق بیشتری بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه با منحنی مشخصه شبیه‌سازی‌شده مدل بروکز-کوری در هر دو رطوبت مشاهده می‌شود (شکل ۲). با وجود اینکه هر دو خاک A و B دارای بافت درشت‌دانه هستند، انتظار می‌رفت که

گرانولت و گرانیت و دکستر و همکاران مناسب‌تر هستند.

متوسط مدل‌های گاردنر، گرانولت و گرانیت و دکستر و همکاران و در بافت درشت مدل‌های گاردنر، ون‌گنوختن،



شکل ۱- منحنی مشخصه خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی با استفاده از معادلات ون‌گنوختن و بروکز-کوری در خاک A (الف) با رطوبت حجمی اولیه ۰/۱۵ و (ب) رطوبت حجمی اولیه ۰/۲۷۷.



شکل ۲- منحنی مشخصه خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی با استفاده از معادلات ون‌گنوختن و بروکز-کوری در خاک B (الف) با رطوبت حجمی اولیه ۰/۱۲۲ و (ب) رطوبت حجمی اولیه ۰/۲۷۱.

ون‌گنوختن همبستگی بیشتری نسبت به معادله بروکز-کوری دارد (R^2 بالاتر و NRMSE کمتر).

نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه

نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه برای سه خاک سری دانشکده، کوی اساتید و شکاربانی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳ میزان خطا را بین داده‌های منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار HYDRUS 1D برای هر دو خاک A و B و در دو رطوبت مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل توانسته اند با بیشترین همبستگی پارامترهای هیدرولیکی را برآورد کنند؛ اما برآورد پارامترهای هیدرولیکی با معادله

جدول ۲- معیارهای ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی و مدل Hydrus-1D

خاک	معادله	θ_s^* ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	R^2	SSQ	RMSE	NRMSE
A	ون گنوختن	۰/۱۵	۰/۹۹۹۸	۰/۱۳	۰/۰۳۶۴	۰/۰۰۰۶۲۷
	بروکز-کوری	۰/۱۵	۰/۹۷	۱۵/۶۸	۱/۲۵	۰/۰۲۱
	ون گنوختن	۰/۲۷۷	۰/۹۹۹۹۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۸۰۹
	بروکز-کوری	۰/۲۷۷	۰/۹۶۷۲	۲/۱۱	۰/۵۹۴۹	۰/۰۳۵
B	ون گنوختن	۰/۱۲۲	۰/۹۹۹۸۲	۰/۰۲۴	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰۶۵
	بروکز-کوری	۰/۱۲۲	۰/۹۵۶۸	۲۲/۸۵	۱/۳۷	۰/۰۱۹
	ون گنوختن	۰/۲۷۱	۰/۹۹۸	۰/۰۳۳	۰/۰۷۵۱	۰/۰۰۴۳
	بروکز-کوری	۰/۲۷۱	۰/۹۵۵	۳/۶۴	۰/۷۵۹۸	۰/۰۴۳۶

* به ترتیب θ_s : رطوبت حجمی اولیه، R^2 : ضریب تعیین، SSQ: مجموع خطای مربع، RMSE: جذر میانگین مربعات خطاها و NRMSE: مربعات خطای نرمال

جدول ۴- برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک سری دانشکده، کوی اساتید و شکاربانی با استفاده از مدل HYDRUS-1D

خاک	I_s (cm)*	L_s (cm)	$\Delta\theta$ (cm cm^{-1})	θ_s^w ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Φ
سری دانشکده	۱۰/۵	۵۳	۰/۱۹۸	۰/۴۱۲	۰/۲۱۴	۰/۴۷
کوی اساتید	۱۱/۵	۴۶	۰/۲۵	۰/۳	۰/۰۵	۰/۳۴
شکاربانی	۱۲/۵	۴۶	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۳۹

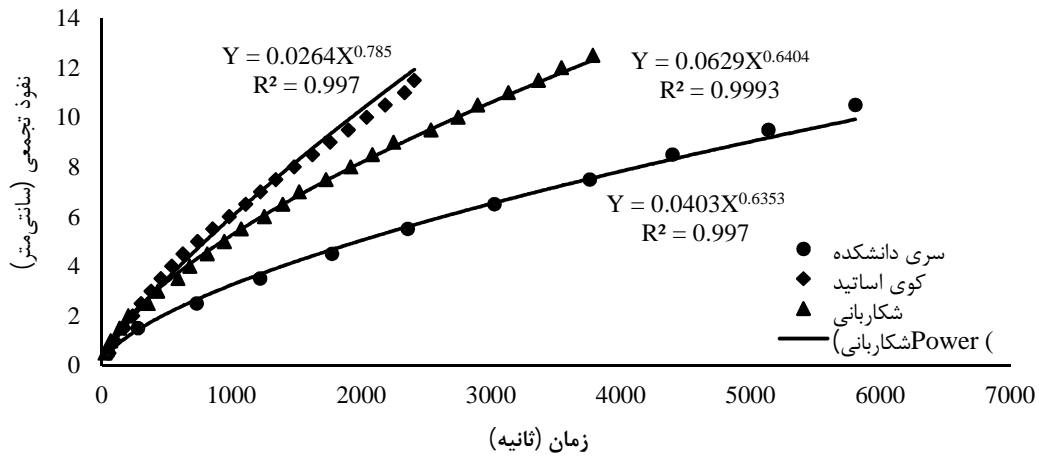
* به ترتیب I_s : عمق آب نفوذ یافته در داخل مزرعه در شرایط مزرعه، L_s : فاصله عمودی بین سطح زمین تا محل جبهه رطوبتی، $\Delta\theta$: میزان افزایش رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی، θ_s^w : رطوبت حجمی اشباع شاخه مرطوب شدن، θ_s : میزان رطوبت حجمی اولیه، Φ : میزان تخلخل

پس از اتمام آزمایش مزرعه، میزان نفوذ تجمعی و میزان بار آب به مدل HYDRUS-1D به عنوان داده ورودی داده شدند و بهترین خصوصیات هیدرولیکی برای این سه خاک با مدل ون گنوختن برآورد شد (جدول ۵).

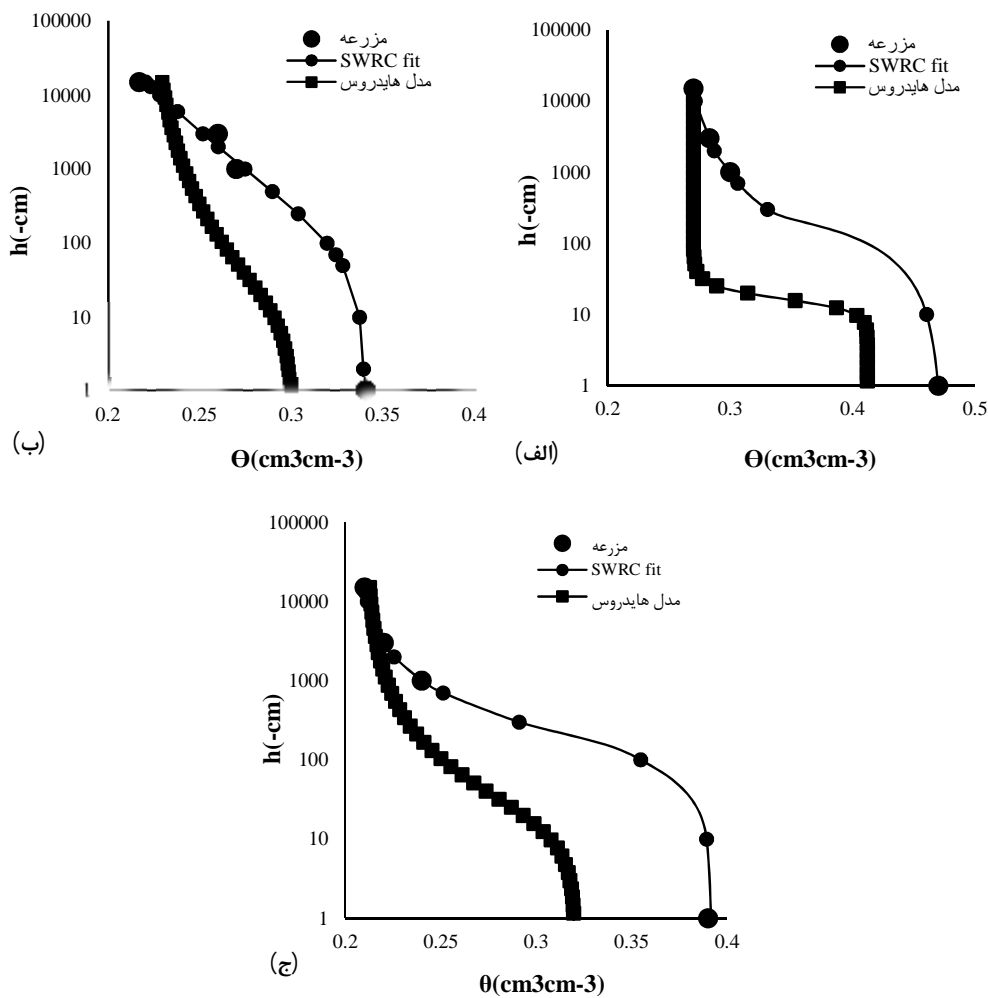
پس از شبیه‌سازی توسط مدل، منحنی مشخصه‌های این سه خاک با داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط مزرعه مقایسه شدند. از آنجا که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه سلول فشاری کم بودند، برای تطابق بهتر و برازش بیشتر این نقاط با مدل ون گنوختن و مقایسه آن با مدل شبیه‌سازی شده از مدل SWRC fit استفاده شد تا شکل کامل‌تری ارائه شود.

شکل ۴ منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده، برازش داده شده با مدل SWRC FIT و پیش‌بینی شده با مدل HYDRUS-1D برای خاک سری دانشکده، خاک کوی اساتید و خاک شکاربانی را نشان می‌دهد. معیارهای آماری (مقدار بالای R^2 و مقدار کم NRMSE) بیان‌کننده این است که مدل HYDRUS-1D با دقت بالایی منحنی مشخصه رطوبتی خاک را تخمین زده است (جدول ۶).

شکل ۳ منحنی‌های نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به زمان را در ایستگاه‌های کوی اساتید، شکاربانی و سری دانشکده با بافت‌های به ترتیب لومی، لومی شنی و لومی رسی نشان می‌دهد. مقدار نفوذ تجمعی آب به خاک در ایستگاه کوی اساتید (با رطوبت حجمی اولیه $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ ۰/۰۵) و شکاربانی (با رطوبت حجمی اولیه $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ ۰/۰۴) در مدت زمان کمتری نسبت به خاک سری دانشکده (با رطوبت حجمی اولیه $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ ۰/۲۱۴) صورت گرفته است (شکل ۳) و علت بیشتر بودن نفوذ تجمعی در این دو ایستگاه می‌تواند ناشی از تفاوت در بافت خاک، میزان رطوبت اولیه و ساختمان خاک باشد. در این راستا، بیگی‌هرچگانی و رحیم‌زادگان (۱۳۶۸) اثر رطوبت اولیه خاک و بار آب بر فرایند نفوذ را در سه بافت خاک بررسی و بیان کردند که تأثیر بافت و رطوبت اولیه خاک بر فرایند نفوذ معنی‌دار بوده است. همچنین واعظی و همکاران (۱۳۹۸) با اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در سه بافت لومی، لوم شنی و لوم رس‌شنی و با چهار سطح رطوبت اولیه نشان دادند که سرعت نفوذ آب در خاک‌ها با تغییر مقدار رطوبت اولیه به شدت تغییر می‌کند.



شکل ۳- منحنی‌های نفوذ تجمعی آب به خاک برای خاک‌های سری دانشکده، کوی اساتید و شکاربانی



شکل ۴- منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده، برازش داده شده با مدل SWRC FIT و پیش‌بینی شده با مدل HYDRUS-1D برای (الف) خاک سری دانشکده، (ب) خاک کوی اساتید، (ج) خاک شکاربانی

جدول ۵- تخمین خصوصیات هیدرولیکی مدل ون گنوختن برای خاک‌های کوی اساتید، شکاربانی و سری دانشکده در مدل Hydrus-1D

خاک	l^*	α^w (cm ⁻¹)	n^w (-)	K_s (cm s ⁻¹)
سری دانشکده	۰/۵	۰/۳۵	۱/۵۹	۰/۰۰۱۴
کوی اساتید	۰/۵	۰/۰۷۸	۱/۲	۰/۰۰۳۸
شکاربانی	۰/۵	۰/۰۵۶	۱/۵۶	۰/۰۰۲۵

* به ترتیب l : پارامتر پیوستگی منافذ خاک، α^w : پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا (cm⁻¹)، n^w : پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی و K_s : پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s⁻¹)

جدول ۶- معیارهای ارزیابی داده‌های مزرعه‌ای و مدل Hydrus-1D

خاک	R^{2*}	SSQ	RMSE	NRMSE
سری دانشکده	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۷۲۴
کوی اساتید	۰/۹۹۷۳	۰/۷۵۵	۰/۱۸۵	۰/۰۰۱۴
شکاربانی	۰/۹۹۹۱	۰/۳۰۸	۰/۱۱۳	۰/۰۰۷۵۶

* به ترتیب R^2 : ضریب همبستگی، SSQ: مجموع خطای مربع، RMSE: جذر میانگین مربعات خطاها و NRMSE: مربعات خطای نرمال

کم‌بودن خطای شبیه‌سازی توسط مدل HYDRUS-1D کم‌بودن خطای شبیه‌سازی توسط مدل HYDRUS-1D ثابت‌نگه‌داشتن مقادیر θ_s ، θ_f و l است. همچنین، نتایج متفاوت حاصل از شبیه‌سازی منحنی مشخصه با معادلات ون گنوختن و بروکز-کوری به دلیل عبور این خاک‌ها از الک‌های با سایزهای متفاوت است، هر چند که هر دو معادله شبیه‌سازی را با دقت بالایی انجام داده بودند. مقایسه منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک‌های سری دانشکده، کوی اساتید و شکاربانی با منحنی مشخصه شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-1D به خوبی اثر پدیده پسماند را نشان داد؛ در نتیجه، مدل HYDRUS-1D می‌تواند با استفاده از روش حل معکوس فرایند نفوذ تحت بار افتان، پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه شاخه مرطوب شدن خاک را با دقت بالایی تخمین بزند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از حمایت دانشگاه شیراز، مرکز مطالعات خشکسالی و قطب علمی مدیریت آب در مزرعه، تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

۱. باباگلی سفیدکوهی ر.، رضانی ی. و شهیدی ع. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی تأثیر آب روی میزان نفوذ در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDEUS. دهمین

منحنی مشخصه داده‌های اندازه‌گیری براساس فرایند خشک کردن خاک حاصل شده است؛ در حالی که، منحنی مشخصه پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS-1D براساس فرایند مرطوب شده خاک است و عدم تطابق بین این دو منحنی به روشنی اثر پدیده پسماند را نشان می‌دهد (شکل ۴). در این راستا عباسی (۱۳۹۲) پسماند رطوبتی در مقیاس لایسمتری در دو خاک لوم سیلت و لوم شنی را با استفاده از مدل تجربی اسکات و مدل مفهومی معلم مدل‌سازی کرد. نتایج وی نشان داد که منحنی مشخصه رطوبتی، مکش ماتریک و رطوبت خاک به شدت تحت تأثیر پسماند رطوبتی قرار گرفتند. همچنین عباسی و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که مطالعه پدیده پسماند رطوبتی به پارامترهای مختلف خاک (مانند بافت خاک، درجه همگنی/ناهمگنی و...) وابسته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی بار افتان نفوذ آب به خاک از استوانه شفاف اکریلیکی در شرایط آزمایشگاهی و استوانه مضاعف در مزرعه استفاده شد. نتایج نشان داد که روش حل عددی معکوس می‌تواند داده‌های نفوذ تجمعی و بار آب را به عنوان داده‌های ورودی در مدل HYDRUS-1D برای استفاده از روش حل معکوس مدنظر قرار دهد. علت

12. Asgarzadeh H. Mosaddeghi M.R. Dexter A. R. Mahboubi A. A. and Neyshabouri M. R. 2014. Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*. 8(20): 226-227.
13. Carsel, R. F. and Parrish R. S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*. 24: 755-769.
14. Hopmans J. W. Šimůnek J. and Bristow K. L. 2002a. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux from heat pulse measurements: Geometry and dispersion effects. *Water Resources Research*. 38(1): 701-714.
15. Hopmans J. W. Simunek, J. Romano N. and Durner, W. 2002b. Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse methods. In: Dane J. H. and Topp G. C. (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4 Physical Methods*, Soil Science Society of America, Inc. Madison. 963-1008.
16. Ines A. V. M. and Droogers P. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6: 49-66.
17. Minasny B. and McBratney A. B. 2002. The Neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*. 66: 352-361.
18. Mohammadzadeh-Habili J. and Heidarpour M. 2015. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils. *Journal of Hydrology*. 527: 824-832.
19. Mohammadzadeh-Habili J. and Khalili D. 2021. Development of the Green-Ampt Infiltration Rate Model and Relationship of the GA Model Parameters with Soil Hydraulic Parameters. *Journal of Hydrology Engineering*. 26(11): 04021033.
20. Reynolds D. E. Elrick W. D. and Youngs E. G. 2002a. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). p.818-820. In: Dane J. H. and Topp G. C. (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4 Physical Methods*, Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.
21. Reynolds D. E. Elrick W. D. and Youngs E. G. 2002b. Single-ring and double-or concentric-ring infiltrometers. p. 821-826. In: Dane J. H. and Topp G. C. (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4 Physical Methods*, Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.
22. Ritter A. Hupet F. Carpena R. M. Lambot S. and Van Clooster M. 2003. Using Inverse Methods for Estimating Soil Hydraulic Properties from Field Data as an Alternative to Direct Methods. *Agricultural Water Management*. 59: 77-96.
- همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری.
۲. بیگی هرچگانی ح. و رحیمزادگان ر. ۱۳۶۸. اثر رطوبت اولیه خاک و بار آب بر فرایند نفوذ در سه بافت مختلف خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۸۹ ص.
۳. عباسی ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۱۵ ص.
۴. عباسی ف. ۱۳۹۲. تخمین منحنی مشخصه با پسماند رطوبتی به روش معکوس و مدل های اسکات و معلم در دو خاک مختلف. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۲): ۳۱۳-۳۲۷.
۵. فراستی م. و شاکری ح. ۱۳۹۷. شبیه سازی نفوذ آب در خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS1D و داده های صحرائی. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۲۵(۳): ۱۱۳-۱۲۸.
۶. فولادوند ح. ر. و گل کار پ. ۱۳۹۷. برازش مدل های مختلف منحنی مشخصه آب خاک بر ۳۰ نمونه خاک استان فارس. پژوهش های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۵(۱): ۳۲۶-۳۱۹.
۷. محمدزاده هایلی ج. و حیدرپور م. ۱۳۹۸. اصلاح معادله نفوذ کاستیاکوف برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک. مجله پژوهشی آب ایران. ۱۳(۱): ۱۶۳-۱۵۷.
۸. مشایخی پ. قربانی دشتکی ش. صدقی م. شیرانی ح. پناهی م. و نوری م. ر. ۱۳۹۵. برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از داده های نفوذ استوانه های دوگانه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۴): ۸۲۹-۸۳۸.
۹. واعضی ع. ر. بهتری م. و فرومدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل های نفوذ آب در خاک های با بافت مختلف تحت مقادیر متفاوت محتوای رطوبت اولیه. اکو هیدرولوژی. ۷(۳): ۷۰۷-۷۱۷.
10. Abbasi F. Javaux M. Vanclooster M. and Feyen J. 2012. Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*. 189-190: 480-490.
11. Abbasi F. Simunek J. Van Genuchten M. T. H. Feyen J. Adamsen F. J. Humsaker D. J. Strelkoff T. S. and Shouse P. 2003. Overland water flow and solute transport: model development and field data analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(2): 71-81.

23. Russo D. Bresler E. Shani U. and Parker J. C. 1991. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. *Water Resource Research*. 27: 1361-1373.
24. Sasidharan S. Bradford S. A. Šimůnek J. and Kraemer S. R. 2019. Drywell infiltration and hydraulic properties in heterogeneous soil profiles. *Journal of Hydrology*. 570: 598-611.
25. Seki K. 2007. SWRC fit: A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 4: 407-437.
26. Šimůnek J. and van Genuchten M.Th. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*. 32(9): 2683–2696.
27. Šimunek J. Jacques D. Hopmans J. W. Inoue M. Flury M. and van Genuchten M.Th. 2002. Solute transport during variably-saturated flow-inverse methods. p. 1435–1449. JH Dane and GC Topp (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 4. Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
28. Šimůnek J. van Genuchten M. Th. and Šejna M. 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Technical Manual, Version 1.0, 213 p.
29. Soler C. M. T. Sentelhas P. C. and Hoogenboom G. 2007. Application of the CSM -CERES -Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*. 27: 165–177.
30. Wang X. P. Cui Y. Pan Y. X. Li X. R. Yu Z. and Young M. H. 2008. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in vegetation-stabilized desert ecosystems. *Journal of Hydrology*. 358(1-2): 134-43.

